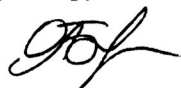


0- 779858

На правах рукописи



БАРХАТОВА
Оксана Михайловна

ИССЛЕДОВАНИЕ ИОНОСФЕРНО-МАГНИТОСФЕРНЫХ
ТОКОВЫХ СИСТЕМ И ИХ ВОЗДЕЙСТВИЯ
НА ИОНОСФЕРНЫЕ ПРОЦЕССЫ
В ПЕРИОДЫ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород 2009

Работа выполнена в Федеральном государственном научном учреждении «Научно-исследовательский радиофизический институт» (ФГНУ НИРФИ) и Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования Нижегородском государственном педагогическом университете (ГОУ ВПО НГПУ)

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук
УРЯДОВ Валерий Павлович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
профессор
ГРАЧ Савелий Максимович

кандидат физико-математических наук
ПЕТРОВ Валерий Григорьевич

Ведущая организация:

Научно-исследовательский институт
физики при Южном федеральном
университете

Защита диссертации состоится « 22 » декабря 2009 г. в 14-30 часов на заседании диссертационного совета Д 002.237.01 при Учреждении Российской академии наук Институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН по адресу: 142190, г. Троицк, Московской области, ИЗМИРАН (проезд автобусом №398 от станции метро «Тёплый стан» до остановки «ИЗМИРАН»).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЗМИРАН.

Автореферат разослан « 20 » ноября 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 002.237.01
доктор
физико-математических наук



Михайлов Ю.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В диссертации исследуется связь динамики магнитосферных токовых систем с процессами в ионосфере во время значительных геомагнитных возмущений. В первую очередь, это исследование связи симметричной и асимметричной частей кольцевого тока с восточной и западной авроральными электроджетами в периоды магнитосферных бурь различной интенсивности. Проведена классификация конкретных бурь для определения степени влияния их интенсивности и продолжительности на уровень связи магнитосферных и ионосферных токовых систем. Рассмотрены вопросы замыкания асимметричного кольцевого тока на ионосферу вследствие развития циклотронной неустойчивости в области дневного и вечернего выступов плазмосферы. Найдено экспериментальное подтверждение образования асимметрии низкоширотного поля магнитного возмущения, обусловленного контуром тока, продольные составляющие которого обеспечиваются высыпанием энергичных частиц кольцевого тока при их взаимодействии с ионно-циклотронными волнами на границах плазмосферных выступов. Проанализированы ионосферные последствия активации авроральных токовых систем, в частности, проблема распространения магнитогравитационных волн в ионосфере и их проявления в перемещающихся ионосферных возмущениях на конкретных трассах наклонного зондирования.

Прикладные задачи диссертационного исследования посвящены разработке методики прогнозирования критической частоты субавроральной ионосферы, разработке методики восстановления рядов данных по максимальной наблюдаемой частоте на трассах наклонного зондирования ионосферы. Для их создания был использован метод искусственных нейронных сетей.

Актуальность проблемы

Изучение магнитосферных и ионосферных токовых систем в геомагнитно-возмущенные периоды позволяет получать представление об общих электродинамических процессах в системе «магнитосфера–ионосфера». Регистрируемые вариации наземного геомагнитного поля в возмущенные периоды свидетельствуют о том, что в магнитосфере текут интенсивные токи – токи на магнитопаузе, кольцевой ток, продольные токи в высоких широтах, ток в хвостовой части магнитосферы. Кроме того, указанные вариации дополняются интенсивными ионосферными токами в полярной шапке и в области овала полярных сияний, где присутствуют восточный и западный электроджеты. Изучение динамики, пространственно-временного распределения и взаимосвязи этих токовых систем представляет большой интерес. К настоящему моменту определены основные механизмы и разработаны модели, описывающие процессы активации, распада и объединения этих токов, что позволяет осуществлять оперативную диагностику и прогнозирование степени развития магнитосферно-ионосферных процессов и их возможных последствий, влияющих на работу наземных и космических технических систем. С этой точки токовые системы магнитосферы и ионосферы играют определяющую роль, поскольку именно они являются ответственными за изменения геомагнитного поля. Поэтому

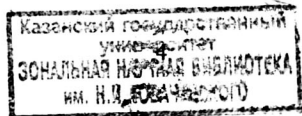
установление причинно-следственных связей в системе «магнитосфера–ионосфера» является на данный момент актуальной задачей научного направления, изучающего электродинамику околоземного космического пространства.

Отдельное направление радиофизических исследований посвящено изучению ионосферных последствий глобальной геомагнитной активности. Ионосфера является ионизированной средой, сильно подверженной внешнему воздействию со стороны физических процессов, происходящих в магнитосфере. Одним из направлений ионосферных исследований является изучение распространения волновых возмущений в этой среде. Основная проблема данного направления – отсутствие возможности прямых измерений, в то время как распространение волн различного типа в ионосфере отражается в динамике ее параметров. К настоящему времени разработана теория распространения волн, которая является физически обоснованной и находит косвенное экспериментальное подтверждение. Однако вследствие сложности ионосферных процессов, любая теория является конкретным приближением, которое учитывает одни факторы, и пренебрегает другими. В этой связи дополнение и уточнение существующей модели и ее отдельных частей важно как с теоретической, так и с прикладной точки зрения. Несмотря на развитие альтернативных видов связи (спутниковая, радиорелейная), коротковолновая радиосвязь остается одним из базовых методов передачи сигнала. Для обеспечения эффективной работы радиоэлектронных систем различного назначения (коротковолновая радиосвязь, загоризонтная радиолокация, радионавигация и радиопеленгация) в условиях динамично изменяющейся ионосферной обстановки необходимо осуществлять их адаптацию к текущему состоянию ионосферы, используя результаты оперативной диагностики ионосферного канала. Использование современных средств мониторинга ионосферного канала позволяет повысить надежность связных систем до 97–99%, т.е. до уровня надежности спутниковой связи. Однако отсутствие разветвленной сети ионозондов приводит к необходимости решения задачи пространственно-временного прогнозирования ключевых параметров ионосферного канала – критических и максимальных наблюдаемых частот.

Цели и задачи работы

Целью диссертационного исследования является установление связи между магнитосферными и ионосферными физическими процессами в периоды геомагнитных возмущений. При этом исследуются ионосферные последствия активации системы «магнитосфера–ионосфера» в условиях повышенной геомагнитной активности. В связи с этим решаются следующие задачи:

1. Исследование связи симметричной и асимметричной частей кольцевого тока с восточным и западным электроджетами в периоды геомагнитных возмущений для установления причинно-следственных связей в системе «магнитосфера–ионосфера». Классификация геомагнитных бурь, которая позволит оценить степень влияния интенсивности и продолжительности магнитной бури на уровень связи между среднеширотными магнитосферными и авроральными ионосферными токовыми системами.



2. Поиск асимметрии низкоширотного поля магнитных возмущений в конкретных секторах местного времени для проверки возможной генерации асимметричного кольцевого тока вследствие взаимодействия энергичных ионов кольцевого тока с дневным и вечерним выступами плазмосферы.
3. Обнаружение магнитогравитационных волн в ионосфере, которые возникают вследствие активации авроральных электроджетов и проявляются на трассах наклонного зондирования ионосферы в форме перемещающихся ионосферных возмущений.

Научная новизна

Методами линейного и нелинейного корреляционного анализа установлена связь симметричной и асимметричной частей кольцевого тока с авроральными электроджетами на разных фазах геомагнитной бури. Определены характерные временные задержки в развитии частей кольцевого тока относительно этих электроджетов. На основе проведенного анализа построена эквивалентная трехмерная ионосферно-магнитосферная токовая система, включающая в себя асимметричный кольцевой ток, восточный и западный электроджеты и токи вдоль силовых линий. Для выявления характерных особенностей в развитии геомагнитного возмущения и их влияния на связь между токовыми системами, была выполнена нейросетевая классификация главных фаз магнитных бурь.

Обнаружена связь вариаций низкоширотного геомагнитного возмущения, определяемого по данным магнитных обсерваторий, с формой плазмопаузы на раннем этапе фазы восстановления бури. Обнаружены отклонения в поведении Н-компонент на магнитных станциях, находящихся под дневным выступом плазмосферы. Результаты спектрального анализа показали, что такое отклонение вызвано высыпанием частиц кольцевого тока вследствие развития циклотронной неустойчивости на границе выступа. Таким образом, проверен и уточнен механизм замыкания асимметричного кольцевого тока на ионосферу. Согласно полученным результатам построена токовая система, возникающая в результате развития циклотронной неустойчивости.

Проведено исследование воздействия на ионосферу параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля методом искусственных нейронных сетей (ИНС), а так же разработана методика прогнозирования критической частоты субавроральной ионосферы на интервалы от 0,5 часа до 2 часов. Определены основные солнечно-магнитосферные параметры, оказывающие наибольшее влияние на изменение критической частоты для дневного и ночного времени суток. Оригинальность предлагаемой методики прогноза заключается в создании ИНС с автоматическим блоком «шлюзования» дополнительных параметров, который позволяет улучшить эффективность прогнозирования критической частоты.

Рассмотрены волновые явления в ионосфере в периоды повышенной геомагнитной активности. Установлено, что перенос ионосферных возмущений из авроральной области к средним широтам возможен не только посредством акустико-гравитационных волн, но и с помощью магнитогравитационных возмущений. Такой результат получен с помощью корреляционного и спектрального анализа максимальных наблюдаемых частот на трассах наклонного

зондирования ионосферы. При этом определены характерные скорости магнитогравитационных волн, согласующиеся с соответствующими дисперсионными зависимостями.

Научная и практическая ценность

На основе анализа связи асимметричной части кольцевого тока с авроральными электроджетами построена трехмерная эквивалентная токовая система. Она включает в себя асимметричный кольцевой ток и восточный и западный электроджеты, которые связаны между собой токами вдоль силовых линий. Построение такой токовой системы позволило объяснить особенности связи между указанными магнитосферными и ионосферными токовыми системами. Эти системы имеют общий энергетический бюджет, поэтому существует баланс связи асимметричного кольцевого тока с авроральными электроджетами. Таким образом, предложен новый способ объединения указанных токовых систем, который не противоречит общим физическим представлениям о развитии магнитосферно-ионосферных процессов и результатам, полученным другими исследователями.

Экспериментально подтвержден механизм замыкания асимметричного кольцевого тока, предложенный группой В.Ю. Трахтенгерца. Для этого методами спектрального анализа исследовались вариации на геомагнитных станциях, расположенных в области дневного выступа плазмосферы. Обнаруженное изменение временного хода горизонтальных компонент на этих станциях в присутствии дневного выступа, а так же присутствие в спектрограммах пульсаций диапазона Pc-4 является признаками существования интенсивного продольного тока. Следовательно, в этой области возможно высыпание частиц кольцевого тока в ионосферу и образование его асимметричной части. Полученные результаты подтверждают гипотезу о существовании трехмерной ионосферно-магнитосферной токовой системы, которая включает в себя асимметричный кольцевой ток и оба авроральных электроджета.

По вариациям максимальных наблюдаемых частот (МНЧ) на трассах наклонного зондирования ионосферы и сопоставления этих вариаций с авроральной возмущенностью обнаружены магнитогравитационные волны (МГВ), скорость которых выше скорости акустико-гравитационных, но ниже скорости магнитогидродинамических волн. Существование такого типа волн в ионосфере позволяет объяснить высокие скорости переноса возмущений из авроральной области к средним широтам. Получены дисперсионные кривые для МГВ, а также проведена оценка скоростей их распространения на основе экспериментальных и теоретических результатов.

В качестве прикладной задачи рассмотрено влияние на критическую частоту субавроральной ионосферы основных солнечно-магнитосферных параметров. Учет этих параметров и предложенный метод «шлюзования» входного пакета данных позволяет с помощью ИНС получить эффективный прогноз критической частоты на субавроральной станции Gakopa (нагревный стенд HAARP) на интервалы от получаса до двух часов. Другим прикладным результатом является разработанная нейросетевая методика восстановления рядов данных по максимальной наблюдаемой частоте на среднеширотных трассах

наклонного зондирования ионосферы. Предложенный метод позволяет с высокой точностью восстанавливать значения максимальных наблюдаемых частот с привлечением минимального набора дополнительных параметров.

Степень достоверности полученных результатов

Результаты, изложенные в диссертационной работе, согласуются с данными существующих экспериментальных наблюдений. Их сопоставление с аналитическими и численными исследованиями других авторов показали, что выводы настоящей работы дополняют и уточняют эти исследования. Основные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых научных журналах «Геомагнетизм и аэрономия» и «Известия ВУЗов – Радиофизика», а также были представлены на Российских и Международных конференциях и Научных семинарах НИРФИ, ИЗМИРАН, ПГИ КНЦ РАН.

Экспериментальные данные

В работе использовались следующие экспериментальные данные:

1. Параметры солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, взятые из базы спутника ACE [<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov>].
2. Индексы геомагнитной активности Dst, SYM, ASY [<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>].
3. Индексы интенсивности авроральных электроджетов AE, AU, AL [<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>].
4. Критическая частота ионосферного слоя F2 на станции Gakona [<http://137.229.36.56/cgi-bin/Catalog.exe>].
5. Интенсивность рентгеновского излучения [<http://www.sel.noaa.gov/today.html>].
6. Интенсивность ультрафиолетового излучения [http://www.timed.jhuapl.edu/scripts/mdc_home.pl].
7. Планетарный индекс геомагнитной возмущенности (Kp*10) [<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/eval2.cgi>].
8. Индекс вытянутости геомагнитного хвоста bi [<http://www.sel.noaa.gov/ftpmenu/lists/bi.html>].
9. Интенсивность свечения ночного неба [http://sd-www.jhuapl.edu/Aurora/ovation/ovation_display.html].
10. Ионосферная модель IRI 2001 [<http://modelweb.gsfc.nasa.gov/models/iri.html>].
11. Данные наземных геомагнитных станций [<http://www.wdc.bgs.ac.uk/catalog/master.html>; The British Geological Survey; Geological Survey of Sweden].
12. Данные о максимальных наблюдаемых частотах (предоставлены ЮФУ и НИРФИ).

На защиту выносятся следующие положения:

1. Построенная трехмерная токовая система «магнитосфера-ионосфера» отражает наблюдаемую связь асимметричной части магнитного поля, которое создается магнитосферным кольцевым током, с магнитным полем, которое генерируется авроральными электроджетами.

2. Обнаруженная дополнительная асимметрия низкоширотного поля геомагнитного возмущения в области дневного и вечернего выступов плазмосферы является следствием замыкания асимметричного кольцевого тока на ионосферу, обусловленного высыпанием ионов кольцевого тока
3. Обоснование существования магнитогравитационных волн в среднеширотной ионосфере вызываемых авроральной активностью с учетом дисперсионных зависимостей магнитогравитационных волн для реальной ионосферы.

Представление результатов

Результаты диссертационной работы докладывались на следующих семинарах и конференциях:

1. 29 Annual Seminar "Physics of auroral phenomena", Apatity, 27 February-3 March 2006.
2. 30 Annual Seminar "Physics of auroral phenomena", Apatity, 27 February-2 March 2007.
3. European Geosciences Union, General Assembly Vienna, Austria, 2007.
4. 11 Пулковская международная конференция по физике Солнца: Физическая природа солнечной активности и прогнозирование ее геофизических проявлений. ГАО РАН, Пулково, Санкт-Петербург, 2–7 июля 2007.
5. Нижегородская сессия молодых ученых (естественнонаучные дисциплины), Татинец, 20–25 апреля 2008.
6. Всероссийская научная конференция «Распространение радиоволн (РРВ-22)», Ростов-на-Дону – п. Лоо, 22–26 сентября 2008.
7. 31-й ежегодный Апатитский семинар «Физика авроральных явлений», 26–29 февраля 2008.
8. European Geosciences Union, General Assembly Vienna, Austria, 2008.
9. Научно-исследовательский институт «Крымская астрофизическая обсерватория», 8–14 июня 2008.
10. 32-й ежегодный Апатитский семинар «Физика авроральных явлений», 3–6 марта 2009.
11. Тринадцатая научная конференция по радиофизике, ГОУ ВПО «Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского», 7 мая 2009.
12. Семинары НИРФИ, ИЗМИРАН и НГПУ.

Публикации

По теме диссертации автором опубликовано 3 статьи в рецензируемых журналах и 15 работ в сборниках и трудах конференций.

Личный вклад соискателя

Автор принимала непосредственное участие в постановке задач и выборе методов их решения, в получении и анализе результатов, а также в их интерпретации. Автором проведены все численные эксперименты, представленные в диссертации, выполненные с использованием самостоятельно разработанных компьютерных программ.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 151 страницу, 82 рисунка и 9 таблиц. Библиография включает в себя 82 наименования.

Во введении изложены основные задачи, решаемые в диссертационном исследовании.

Первая глава диссертации посвящена обзору отдельных современных направлений в солнечно-земной физике. Рассматриваются магнитосферные и ионосферные процессы в условиях повышенной геомагнитной возмущенности, а так же уделяется внимание волновым возмущениям в ионосфере. В первом разделе рассмотрено развитие симметричной и асимметричной частей кольцевого тока на разных фазах развития геомагнитной бури. Особое внимание уделено асимметричному кольцевому току и его пространственному положению [Liemohn, et al., 2001; Francia et al., 2004]. Приведены результаты моделирования кольцевого тока. Во втором разделе отмечается, что магнитная буря является интервалом времени, в течение которого активизируются токовые системы авроральных электроджетов. Здесь подробно изложены результаты исследований связи магнитосферных и ионосферных токовых систем в периоды магнитных бурь [Grafe et. al., 1997; Grafe and Feldstein, 2000]. Третий раздел посвящен плазмосфере и ее динамике в геомагнитно-возмущенные периоды. Рассмотрено образование дневного и вечернего выступов плазмосферы, а также формирование облаков плазмы, отделившейся от вечернего выступа плазмосферы (detached plasma). В четвертом разделе представлен механизм взаимодействия энергичных ионов кольцевого тока с вечерним выступом плазмосферы – развитие циклотронной неустойчивости в этой области и высыпание энергичных ионов кольцевого тока в конус потерь из-за взаимодействия с ионно-циклотронными волнами [Bespalov and Trakhtengerts, 1986; Trakhtengerts and Demekhov, 2005]. В пятом разделе изложены основные понятия об ионосфере и базовые уравнения для распространения акустико-гравитационных и магнитогравиационных волн [Hocke and Schlegel, 1996; Сорокин и Федорович, 1982; McLellan and Winterberg, 1968]. Введены понятия критических и максимальных наблюдаемых частот.

Вторая глава посвящена изучению вопросов развития и распада кольцевого тока в условиях магнитосферных бурь. В первом разделе сформулирована задача установления связи между токовыми системами симметричного и асимметричного кольцевого тока и авроральными электроджетами. На основе выполненного корреляционного исследования между индексами интенсивности кольцевого тока и индексами интенсивности авроральных электроджетов установлены характерные времена развития этих токов в период геомагнитного возмущения. Обнаружено, что на главной фазе геомагнитной бури асимметричная часть кольцевого тока имеет связь с обоими – восточным и западным электроджетами и развивается с ними синхронно. Временной сдвиг в развитии симметричного кольцевого тока относительно восточного электроджета составляет порядка получаса и относительно западного электроджета – порядка двух часов. По результатам анализа суммарного коэффициента корреляции для конкретных секторов местного времени построена

трехмерная эквивалентная ионосферно-магнитосферная токовая система (см. рис. 1).

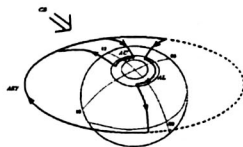


Рис. 1. Эквивалентная ионосферно-магнитосферная токовая система связи кольцевого тока и авроральных токовых электроструй, которая включает в себя асимметричную часть кольцевого тока (ASY), замкнутую на оба электроджета – восточный (AU) и западный (AL) продольными токами. Стрелкой показано направление солнечного ветра, взаимодействующего с магнитосферой

Во втором разделе произведен поиск параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, оказывающих наибольшее влияние на токовые системы кольцевого тока и авроральных электроджетов. Также оценены средние времена реакции магнитосферы на подошедшее возмущение. Установлено, что на кольцевой ток наибольшее воздействие оказывают скорость солнечного ветра и его концентрация. Среднее время реакции магнитосферы на изменения ПСВ составляет около 30–40 минут для геомагнитных бурь высокой и средней интенсивностей ($Dst < -100$ nT). На авроральные электроджеты наибольшее влияние оказывают компоненты вектора межпланетного магнитного поля (ММП) V_y и V_z для геомагнитных бурь любой интенсивности. Характерное время реакции магнитосферы для компоненты V_y составляет порядка 30 минут. В третьем разделе по результатам нейросетевых экспериментов обнаружена возможность удовлетворительного восстановления значений индексов интенсивности авроральных электроджетов по данным об индексах интенсивности симметричной и асимметричной частей кольцевого тока. Это подтверждает наличие связи между авроральными электроджетами и кольцевым током на главной фазе геомагнитной бури, установленной в первом параграфе. Проанализировано «смещение» во времени развития авроральных электроджетов относительно друг друга. Результаты позволяют предположить, что токовые системы асимметричного кольцевого тока и восточного и западного электроджетов имеют общий энергетический бюджет, что подтверждает существование на главной фазе бури трехмерной ионосферно-магнитосферной токовой системы. В четвертом разделе проведена классификация всех исследуемых геомагнитных возмущений для установления характерных особенностей обнаруженной связи между токовыми системами (см. рис. 2). Результаты были получены для пар индексов SYM и AU, SYM и AL, ASY и AU, ASY и AL.

Разработанный классификационный подход позволяет установить общие закономерности протекания ионосферно-магнитосферных процессов на главной фазе геомагнитной бури с точки зрения их динамики и энергетической составляющей. Согласно полученным результатам, установлена корреляционная связь между симметричным кольцевым током и авроральными электроджетами на главной фазе геомагнитной бури. Связь между асимметричной частью

кольцевого тока и электроджетами имеет более сложный характер благодаря наличию временного «смещения» в развитие электроджетов, однако указанные токи составляют единую токовую систему.

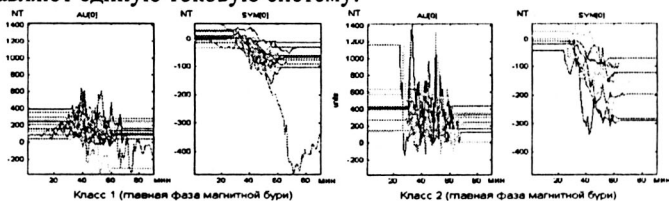


Рис. 2. Пример классификации исследуемых геомагнитных бурь по индексам кольцевого тока SYM и восточного электроджета AU. Два левых столбца графиков относятся к первому классу, два правых – ко второму классу.

Третья глава содержит исследование влияния дневного и вечернего выступов плазмосферы на асимметрию возмущений магнитного поля Земли. В первом разделе рассматриваются спектральные особенности вариаций горизонтальной составляющей геомагнитного поля на двух меридиональных цепочках станций. Первая цепочка находится в области вечернего выступа плазмосферы, а вторая цепочка – в области дневного выступа. Результаты спектрального анализа магнитных записей на двух меридиональных цепочках станций свидетельствуют о повышении амплитуды частот спектров, соответствующих пульсациям в диапазоне Pc-4 (с частотами выше $6 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$), при входе магнитных станций в области силовых линий геомагнитного поля, отвечающих плазмосферным выступам. Повышение амплитуд частот спектров, которые соответствуют колебаниям в диапазоне частот пульсаций Pc-4, отмечается на станциях с геомагнитной широтой ниже 45° для дневного выступа и на всех широтах для вечернего выступа. При учете возможности возникновения продольных токов вследствие развития циклотронной неустойчивости на восточных границах плазмосферных выступов, повышение амплитуд частот спектров в диапазоне пульсаций Pc-4 может свидетельствовать о нестабильности этих токов, отмечаемой в магнитных возмущениях у поверхности Земли. Во втором разделе проводится сопоставление временного хода горизонтальных компонент на станциях, принадлежащих и не принадлежащих дневному выступу плазмосферы. Геометрия расположения станций представлена на рис. 3.

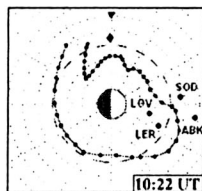


Рис. 3. Расположение геомагнитных станций Abisko (68.36 N, 18.82 E), Lerwick (60.13 N, 358.82 E), Lovoe (59.34 N, 17.82 E), Sodankyla (67.37 N, 26.63 E) относительно дневного выступа плазмосферы 27 июня 2001

Сопоставление временного хода Н-компонент на станциях Lerwick (LER) (60.13 N, 358.82 E) и Lovoe (LOV) (59.34 N, 17.82 E), находящихся под дневным выступом, и станциях вне выступа Abisko (ABK) (68.36 N, 18.82 E) и Sodankyla (SOD) (67.37 N, 26.63 E), показывает, что в момент прохождения станциями LER, LOV дневного выступа, наблюдается значительный провал в горизонтальной составляющей. На станциях ABK, SOD подобных изменений не наблюдается (см. рис. 4). Это означает, что над станциями LER, LOV протекает интенсивный ток, связанный с дневным выступом плазмосферы.

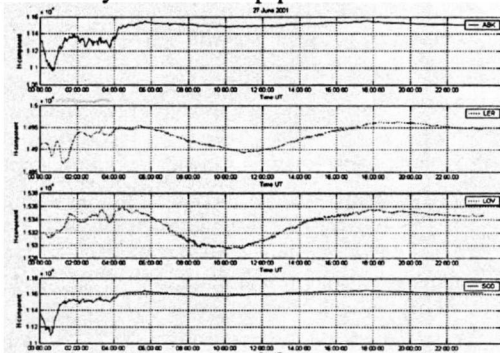


Рис. 4. Магнитные записи на станциях Abisko (68.36 N, 18.82 E), Lerwick (60.13 N, 358.82 E), Lovoe (59.34 N, 17.82 E), Sodankyla (67.37 N, 26.63 E) 27 июня 2001. Станции ABK, SOD находятся вне дневного выступа плазмосферы, станции LER, LOV – внутри дневного выступа плазмосферы (вторая и третья панели)

В третьем разделе проводится анализ динамических спектров горизонтальных компонент векторов магнитного поля Земли на наземных геомагнитных станциях, находящихся внутри и за пределами дневного выступа плазмосферы. На рис. 5 представлены динамические амплитудно-частотные спектры горизонтальной составляющей геомагнитного поля для трех из рассматриваемых станций 10 и 27 июня 2001.

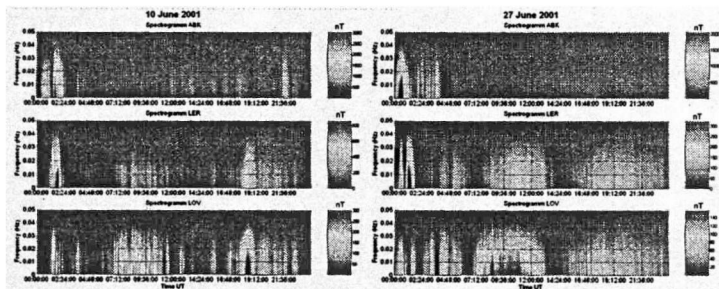


Рис. 5. Амплитудно-частотные динамические спектры Н-компоненты для станций Abisko (68.36 N, 18.82 E), Lerwick (60.13 N, 358.82 E), Lovoe (59.34 N, 17.82 E) 10 и 27 июня 2001. При построении динамических спектров использованы данные с разрешением 10 сек

Основным результатом является обнаружение пульсаций диапазона Рс-4 в вариациях Н-компоненты на станциях, принадлежащих выступу. Это является косвенным подтверждением предположения о формировании интенсивных токов вдоль силовых линий, которые образовались в результате взаимодействия ионно-циклотронных волн с дневным выступом плазмосферы.

Четвертая глава посвящена изучению волновых процессов в ионосфере, а также рассмотрению критических и максимальных наблюдаемых частот ионосферного слоя F2 в геомагнитно-возмущенные и невозмущенные периоды. В первом параграфе, в качестве прикладной задачи, разработан оригинальный метод прогнозирования критической частоты ионосферы на интервалы от получаса до двух часов с помощью искусственной нейронной сети типа Элмана. Оригинальность предлагаемой методики заключается в разработке метода «шлюзования» входного пакета данных. «Шлюз» в данном случае представляет собой своеобразный ключ, который позволяет осуществлять прогноз критической частоты на дневном интервале только по «дневным» параметрам, а на ночном интервале – по «ночным». Оригинальность предлагаемой методики заключается в разработке метода «шлюзования» входного пакета данных. «Шлюз» в данном случае представляет собой своеобразный ключ, который позволяет осуществлять прогноз критической частоты на дневном интервале только по «дневным» параметрам, а на ночном интервале – по «ночным».

Во втором разделе исследуется поведение критической частоты субавроральной ионосферы на станции Gakona и ее зависимости от солнечно-магнитосферных параметров в ночное и дневное время. Анализ эффективностей прогнозирования и сопоставление солнечно-магнитосферных параметров для дневного и ночного интервалов позволяет заключить, что для эффективного прогноза значений критической частоты в качестве входных параметров в дневное время необходимо использовать саму последовательность $f_{кр}$ и ее первую производную (предыстория), а в качестве дополнительных входных параметров – солнечно-зенитный угол и интенсивность рентгеновского излучения. В ночное время предыстория должна быть дополнена отношением интенсивностей свечения ночного неба II и динамическим давлением солнечного ветра. В третьем разделе исследуется пространственно-временная корреляция максимальных наблюдаемых частот (МНЧ) на среднеширотных трассах наклонного зондирования ионосферы. Анализ вариаций коэффициентов корреляции позволил обнаружить на этих трассах перемещающиеся ионосферные возмущения и оценить их периоды и скорости. В качестве прикладной задачи проведено восстановление рядов данных МНЧ на одной из трасс по данным МНЧ на другой трассе. В четвертом разделе проводится исследование связи МНЧ на трассах наклонного зондирования ионосферы с авроральной активностью, характеризуемой индексом AE. Установлено, что возмущения авроральных электроджетов находят свое отражение в МНЧ на всех исследуемых трассах. Пятый раздел посвящен обнаружению магнитогравитационных (МГВ) волн по результатам спектрального анализа МНЧ на трассах наклонного зондирования. На рис. 6 приведены примеры сопоставления спектрограмм индекса AE с МНЧ на

каждой трассе наклонного зондирования при малых временных задержках МНЧ относительно АЕ.

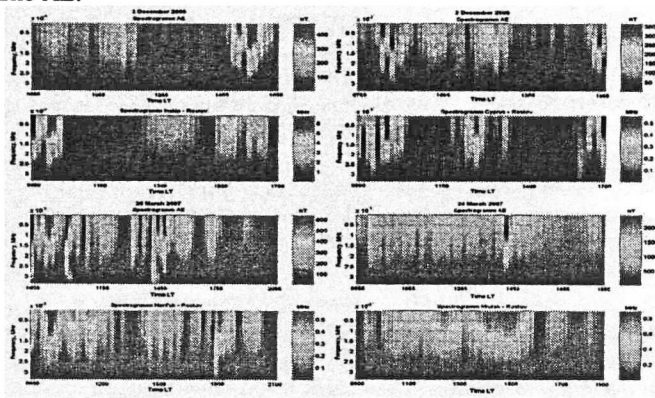


Рис. 6. Спектрограммы МНЧ с временной задержкой 5 минут относительно индекса АЕ на трассах: а) Инскл – Ростов-на-Дону; б) Кипр – Ростов-на-Дону; в) Норильск – Ростов-на-Дону; д) Иркутск – Ростов-на-Дону

Для каждой из трасс наклонного зондирования в этих случаях наблюдается совпадение спектральных особенностей, что свидетельствует о высоких скоростях переноса авроральных возмущений до точек отражения. Такие случаи, скорее всего, связаны с переносом возмущений посредством МГВ. Проведена экспериментальная оценка скоростей распространяющихся МГВ – они составляют до 5000 м/с. В шестом разделе проведено магнитогидродинамическое (МГД) моделирование распространения возмущений в ионосферной плазме. Согласно модельным расчетам, возмущения всех параметров среды проявляются значительно при задании начального магнитного возмущения вдоль силовой линии геомагнитного поля. Это может означать, что в среде, близкой к ионосфере, даже незначительные возмущения магнитного поля, вызванные, например нестабильностью авроральных электроджетов, могут успешно распространяться к средним широтам на расстояния до 2000–3000 км.

Исследование МГВ в ионосфере проведено в приближении идеальной магнитной гидродинамики в гравитационном поле:

$$\rho \frac{dv}{dt} = -\nabla p + \rho g - \frac{1}{4\pi} \mathbf{H} \times (\nabla \times \mathbf{H}), \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div } \rho \mathbf{v} = 0, \quad \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = \text{rot}[\mathbf{v} \times \mathbf{H}],$$

$$\frac{ds}{dt} = \frac{\partial s}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla s = 0.$$

Здесь \mathbf{v} – вектор скорости движения среды, связанной с распространением в ней волновых возмущений, p – давление, ρ – плотность плазмы, s – энтропия, \mathbf{g} – вектор силы тяжести. Принимая распределение давления и плотности экспоненциальным: $\rho_0 = \rho_n e^{-z/H}$ и $p_0 = p_n e^{-z/H}$, где

ρ_n и p_n – плотность и давление в среде при $z = 0$ (на земной поверхности) и проводя линейаризацию приведенных выше уравнений, для плоской волны получаем выражение для скорости \mathbf{v} :

$$\omega^2 \mathbf{v} - c_s^2 (\mathbf{k} \cdot \mathbf{v}) \mathbf{k} + i(\mathbf{v} \cdot \mathbf{g}) \mathbf{k} + i(\gamma - 1)(\mathbf{k} \cdot \mathbf{v}) \mathbf{g} + \frac{1}{4\pi\rho_0} \mathbf{H}_0 \times \left\{ \mathbf{k} \times [\mathbf{k} \times (\mathbf{v} \times \mathbf{H}_0)] \right\} = 0,$$

из которого следует дисперсионное уравнение шестого порядка по частоте ω :

$$\begin{aligned} & \omega^6 + \omega^4 \left[-c_s^2 k^2 - ig\gamma k_z - \frac{H_0^2 k^2}{4\pi\rho_0} - \frac{(\mathbf{H}_0 \cdot \mathbf{k})^2}{4\pi\rho_0} \right] + \\ & + \omega^2 \left\{ g^2 (\gamma - 1)(k^2 - k_z^2) + ig\gamma \left[\frac{(\mathbf{H}_0 \cdot \mathbf{k})^2}{4\pi\rho_0} (k_z + 2c_s^2 k^2) + \frac{(H_z + H_0^2)(\mathbf{H}_0 \cdot \mathbf{k})^2 k^2}{4\pi\rho_0} \right] \right\} - \\ & - ig\gamma \frac{H_z (\mathbf{H}_0 \cdot \mathbf{k})^3}{(4\pi\rho_0)^2} k^2 - g^2 (\gamma - 1) \frac{(\mathbf{H}_0 \cdot \mathbf{k})^2}{4\pi\rho_0} (k^2 - k_z^2) - \frac{c_s^2 k^2 (\mathbf{H}_0 \cdot \mathbf{k})^4}{4\pi\rho_0} = 0 \end{aligned}$$

Из полученного дисперсионного уравнения выделяются Альвеновская мода

$$\omega^2 = \frac{(\mathbf{H}_0 \cdot \mathbf{k})^2}{4\pi\rho_0} \text{ и дисперсионное уравнение четвертого порядка, которое}$$

описывает распространение МГВ

$$\omega^4 + \omega^2 \left(-ig\gamma k_z - c_s^2 k^2 - \frac{H_0^2 k^2}{4\pi\rho_0} \right) + g^2 (\gamma - 1)(k^2 - k_z^2) + c_s^2 \frac{(\mathbf{H}_0 \cdot \mathbf{k})^2}{4\pi\rho_0} k^2 + ig\gamma \frac{H_z (\mathbf{H}_0 \cdot \mathbf{k}) k^2}{4\pi\rho_0} = 0.$$

На основании этого уравнения построены дисперсионные кривые для МГВ. При распространении этих волн в ионосфере выделяются две моды – «+мода» и «-мода». На рис. 7 представлены решения дисперсионного уравнения в безразмерных переменных для этих мод.

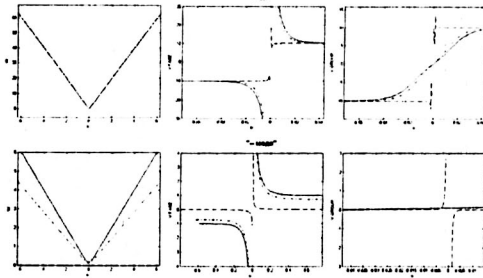


Рис. 7. Дисперсионные зависимости для «+ моды» (верхняя панель) и «- моды» (нижняя панель). Сплошная линия соответствует $\theta = 0^\circ$, штрихпунктирная линия – $\theta = 45^\circ$, пунктирная линия – $\theta = 90^\circ$

Построенные дисперсионные зависимости позволяют провести оценку частот МГВ, отвечающих экспериментально оцененным скоростям распространения изучаемых волн. Полученные результаты показывают, что

возможен перенос возмущений на частоте $\omega \approx (1-2) \cdot 10^{-4}$ Гц, отвечающих «+ моде» и распространяющихся со скоростями 2000–5000 м·с⁻¹.

В заключении представлены основные результаты и выводы проведенного исследования:

1. Установлено наличие корреляционной связи между интенсификацией авроральных и среднеширотных токовых систем. Обнаружено, что в период главной фазы геомагнитной бури асимметричная часть кольцевого тока имеет связь с обоими электроджетами и развивается с ними синхронно. Временной сдвиг в развитии симметричного кольцевого тока относительно восточного электроджета составляет порядка получаса и относительно западного электроджета – порядка одного часа. Результаты статистического анализа коэффициентов линейной корреляции между асимметричным кольцевым током и восточным и западным электроджетами на главной фазе геомагнитной бури демонстрируют связь асимметрии с обоими электроджетами. По результатам анализа этой связи построена трехмерная ионосферно-магнитосферная токовая система, которая включает в себя асимметричный кольцевой ток, восточный и западный электроджеты, и токи вдоль силовых линий. Разработан классификационный подход, который позволяет установить общие закономерности протекания ионосферно-магнитосферных процессов на главной фазе геомагнитной бури с точки зрения их динамики и энергетической составляющей.

2. Установлено, что развитие плазмосферных выступов в периоды повышенной магнитной возмущенности может быть замечено на поверхности Земли как увеличение интенсивности ряда спектральных составляющих в диапазоне геомагнитных пульсаций. Пространственная локализация дневного выступа плазмосферы позволила провести сопоставление временного хода горизонтальной составляющей на станциях, находящихся на магнитных силовых линиях, соответствующих этому выступу, и станциях, находящихся за его пределами. Согласно результатам проведенных исследований, при входе магнитных станций в область дневного выступа наблюдается провал в горизонтальной составляющей геомагнитного поля. Это может быть связано с формированием дополнительного тока вдоль силовых линий. Проведен сравнительный анализ динамических амплитудно-частотных спектров Н-компонент для станций, находящихся в области дневного выступа плазмосферы и станций, находящихся за его пределами. При входе магнитных станций в область дневного выступа плазмосферы обнаружены всплески интенсивности частот в диапазоне геомагнитных пульсаций. В том числе, обнаружено присутствие пульсаций диапазона Pc4, что является косвенным признаком интенсивного продольного тока в этой области.

3. В результате сравнительного, корреляционного и спектрального исследований динамики МНЧ и вариаций индекса авроральной активности АЕ обнаружены волновые возмущения со скоростями, превышающими скорости распространения АГВ в ионосфере. Такие случаи могут быть связаны с переносом авроральных возмущений до точек отражения трасс наклонного зондирования ионосферы посредством МГВ. Сопоставление результатов численного МГД моделирования

показывает, что возмущения всех параметров среды проявляются значительно именно при задании начального магнитного возмущения вдоль силовой линии геомагнитного поля. Это может означать, что в среде, близкой к ионосфере, даже незначительные возмущения магнитного поля, вызванные, например нестабильностью авроральных электроджетов, могут успешно распространяться к средним широтам на расстояния до 2000–3000 км. Кроме того, в такой среде перенос возмущений магнитного поля является более предпочтительным по сравнению с возмущением плотности. Следовательно, распространение МГВ от авроральных источников в сторону средних широт является возможным. Получены дисперсионные кривые МГВ, благодаря которым возможна оценка частот и скоростей их распространения, а так же сопоставление оцененных величин с экспериментально полученными значениями. Согласно рассчитанным дисперсионным кривым МГВ, возможен перенос возмущений на частоте $\omega \approx (1-2) \cdot 10^{-4}$ Гц, распространяющихся со скоростями 2000–5000 м·с⁻¹.

Экспериментальная и теоретическая оценки скоростей переноса МГВ в ионосфере для случая горизонтального распространения дают значения одного порядка.

Список работ по теме диссертации

1. Barkhatov N.A., Levitin A.E., Tserkovniuk (Бархатова) О.М. Analysis of connection of indexes SYM, ASY of the ring current magnetic field with indexes AE (AU, AL). Abstracts of 29 Annual Seminar "Physics of auroral phenomena", Apatity, 27 February-3 March 2006, PGI KSC RAS, P.21.
2. Barkhatov N.A., Levitin A.E., Tserkovniuk (Бархатова) О.М. "Connection of geomagnetic indexes SYM, ASY with polar indexes AE (AU, AL) on different phases of a geomagnetic storm". Abstracts of COSPAR SCIENTIFIC ASSEMBLY, Beijing, China, 16 - 23 July 2006. Session D3.2, A-00875.
3. Barkhatov N.A., Levitin A.E., Tserkovniuk (Бархатова) О.М. The Analysis of relationship between Magnetic Field Global indices (SYM, ASY) and auroral electrojet Indices (AU, AL) at the account of Parameters of a Solar Wind and an Interplanetary Magnetic Field. Abstracts of 30 Annual Seminar "Physics of auroral phenomena", Apatity, 27 February-2 March 2007, PGI KSC RAS, P.15.
4. Barkhatov N.A., Levitin A.E., Tserkovniuk (Бархатова) О.М. Analysis of connection of indexes SYM, ASY of the ring current magnetic field with indexes AE (AU, AL). Proceedings of 29 Annual Seminar "Physics of auroral phenomena", Apatity, 2007, PGI KSC RAS, P.17.
5. Barkhatov N.A., Levitin A.E., Tserkovniuk (Бархатова) О.М. Influence of Solar Wind Parameters and Interplanetary Magnetic Field on Global and Polar Indices of Geomagnetic Activity during Geomagnetic Storms. Geophysical Research Abstracts, Vol. 9, 05662, 2007, SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU2007-A-05662, European Geosciences Union, General Assembly 2007, Vienna, Austria, 15–20 April 2007.
6. Бархатова О.М., Смирнова А.С., Улыбина Р.И., Бархатов Н.А., Урядов В.П. Учет солнечно-магнитосферных связей в задаче прогноза параметров субавроральной ионосферы. // Тез. докл. 11 Пулковской межд. конф. по физике Солнца: Физическая природа солнечной активности и прогнозирование ее геофизических проявлений. ГАО РАН, Пулково, Санкт-Петербург, 2–7 июля 2007, С. 20.
7. Barkhatov N.A., Levitin A.E., Tserkovniuk (Бархатова) О.М. The analysis of the relationship between Magnetic Field Global Indices (SYM, ASY) and Auroral

Electrojet Indices (AU, AL) under the account of Parameters of a Solar Wind and an Interplanetary Magnetic Field. "Physics of Auroral Phenomena", Proc. XXX Annual Seminar, Apatity, Kola Science Centre, Russian Academy of Science, 2007, P. 13–16.

8. Бархатов Н.А., Левитин А.Е., Церковнюк (Бархатова) О.М. Анализ связи индексов, характеризующих симметричный SYM и асимметричный ASY кольцевой ток, с индексами активности авроральных электроструй AE (AU, AL). // Геомагнетизм и аэрономия, Т.48, №4, С. 520-525, 2008.
9. Barkhatova O.M., Levitin A.E. Neural networks technique of layer F2 critical frequency forecasting above station Gakona (HAARP) at the account of near-Earth space parameters and geomagnetic disturbance. Abstracts of 31 Annual Seminar "Physics of auroral phenomena", Apatity, 26–29 February 2008, PGI KSC RAS, P.11–12.
10. Barkhatova O.M., Revunov S.E., Barkhatov N.A., Levitin A.E. Nonlinear connection of global and polar current systems on the main phase of a geomagnetic storm. Abstracts of 31 Annual Seminar "Physics of auroral phenomena", Apatity, 26–29 February 2008, PGI KSC RAS, P.17–18.
11. Бархатова О.М., Урядов В.П., Вертоградов Г.Г., Вертоградов В.Г. О пространственно-временной корреляции максимальной наблюдаемой частоты на среднеширотных радиопереходах. // Тр. всерос. науч. конф. «Распространение радиоволн (РПВ-22), Ростов-на-Дону – п. Лоо, 22–26 сентября, Т.2, С. 163–166, 2008.
12. O. Barkhatova, V. Uryadov, G. Vertogradov, V. Vertogradov Short-term forecasting of the maximum observed frequency on middle-latitude paths of oblique ionospheric sounding, Geophysical Research Abstracts, Vol. 10, EGU2008-A-00000, 2008.
13. Barkhatova O.M., Revunov S.E., Barkhatov N.A., Levitin A.E. «Polar current systems at the main phase of a geomagnetic storm» «Physics of Auroral Phenomena», Proc. XXXI Annual Seminar, Apatity, Kola Science Centre, Russian Academy of Science, 2008, P. 13–16
14. Barkhatova O.M., Levitin A.E. «Neural networks technique of layer F2 critical frequency forecasting above station Gakona (HAARP) at the account of near-earth space parameters and geomagnetic disturbance», Proc. XXXI Annual Seminar, Apatity, Kola Science Centre, Russian Academy of Science, 2008, P. 137–140.
15. O.M. Barkhatova, N.A. Barkhatov, G.I. Grigor'ev «Display of magnetogravitational waves caused by polar instability, in traveling ionospheric disturbances», Abstracts of 32 Annual Seminar "Physics of auroral phenomena", Apatity, 3–6 March 2009, PGI KSC RAS, P.51-52.
16. O.M. Barkhatova, P.A. Besspalov, A.E. Levitin «Connection of time-spatial variations of a geomagnetic field horizontal components with the plasmapause form on a recovery phase», Abstracts of 32 Annual Seminar "Physics of auroral phenomena", Apatity, 3 - 6 March 2009, PGI KSC RAS, P.15.
17. Бархатова О.М., Смирнова А.С., Улыбина Р.И. Учет солнечно-магнитосферных связей в задаче прогноза критической частоты субавроральной ионосферы. // Известия ВУЗов Радиофизика, Т. 52, №2, С.109–117, 2009.
18. Бархатова О.М., Урядов В.П., Вертоградов Г.Г., Вертоградов В.Г. О пространственно-временной корреляции максимальной наблюдаемой частоты на среднеширотных радиопереходах. // Известия ВУЗов Радиофизика, Т. 52, №1, С.28-36, 2009.

Литература

1. Сорокин В.М., Федорович Г.В. Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме. Энергоиздат, М. 1982, с.136.
2. Bepalov, P. A., and V. Y. Trakhtengerts. The cyclotron instability in the Earth radiation belts, in *Reviews of Plasma Physics*, 1986. V. 10, P. 155, Springer, New York.
3. Francia P., Villante U., Adorante N., Gonzalez W.D. The storm-time ring current: a statistical analysis at two widely separated low-latitude stations. *Annales Geophysicae*, 2004. 22: 3699–3705.
4. Grafe A., Bepalov P.A., Trakhtengerts V.Y., Demekhov A.G. Afternoon mid-latitude current system and low-latitude geomagnetic field asymmetry during geomagnetic storms // *Annales Geophysicae*, 1997. 15. 1537–1547.
5. Grafe A. and Feldstein Y.I. About the relationship between auroral electrojets and ring currents. *Annales Geophysicae*, 2000. 18. 874–886.
6. Hocke K. and Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982–1995 // *Annales Geophysicae*, 1996. V. 14. P. 917–940.
7. Liemohn M.W., Kozyra J.U., Thomsen M.F., Roeder J.L., Lu G., Borovsky J.E., and Cayton T.E. Dominant role of the asymmetric ring current in producing the stormtime Dst* // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. N. A6. P. 10883–10904.
8. McLellan A. and Winterberg F. Magneto-gravity waves and the heating of the solar corona // *Solar Physics* 1968. 4. P. 401–408.
9. Trakhtengerts V. Y., Demekhov A. G. Discussion paper: Partial ring current and polarization jet // *International Journal of Geomagnetism and Aeronomy*, 2005. V.5. G13007. doi:10.1029/2004GI000091.

Благодарности

Исследование современных научных проблем, получение и интерпретация результатов, представленных в настоящей диссертации, было выполнено под профессиональным и исчерпывающим руководством моего Учителя, доктора физико-математических наук, профессора Николая Александровича Бархатова. Несколько лет активной научной деятельности по изучению современных проблем солнечно-земной физики позволили автору перенять у профессора Н.А. Бархатова основные принципы научной работы, знания и опыт, за что выражаю ему глубокую благодарность.

За постоянную поддержку моей работы выражаю благодарность моему официальному научному руководителю, заведующему сектором НИРФИ доктору физико-математических наук Валерию Павловичу Урядову. Благодарю моих соавторов Левитина Анатолия Ефимовича, Беспалова Петра Алексеевича, Григорьева Геннадия Ивановича за интеллектуальное участие в моей работе, полезные дискуссии и советы. Благодарю Людмилу Ивановну Грому и коллектив лаборатории магнитосферных возмущений ИЗМИРАН за помощь в получении и обработке геофизических данных, а так же сотрудников Научно-исследовательской лаборатории Физики Солнечно-Земных связей Нижегородского Государственного Педагогического Университета за дружескую помощь и поддержку в решении ряда научных задач.

Признательна Вадиму Федоровичу и Валентине Кузьминичне Церковнюкам за участие в моей судьбе.

102

БАРХАТОВА
Оксана Михайловна

ИССЛЕДОВАНИЕ ИОНОСФЕРНО-МАГНИТОСФЕРНЫХ ТОКОВЫХ
СИСТЕМ И ИХ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ИОНОСФЕРНЫЕ ПРОЦЕССЫ
В ПЕРИОДЫ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать 18.11.2009. Формат 60 X 90/16
Бумага писчая. Усл. п. л. 1.
Тираж 100. Заказ 5592

Отпечатано в ФГНУ НИРФИ
603950 г. Нижний Новгород, ул. Б. Печерская, 25/12а